



测,若风电场还有其他气象要素需进行观测,一般也布置在基本(主)测风塔上。

对于一座70m高度的测风塔,风速观测若设置3层,则一般考虑在10m、40m(或50m)、70m高度设置;若设置4层,则一般考虑在10m、30m、50m、70m高度设置;若设置5层,则一般考虑在10m、30m、50m、60m、70m高度设置;若设置6层,则一般考虑在10m、25m(或30m)、40m、50m、60m、70m高度设置;若设置7层,则一般考虑在10m、20m、30m、40m、50m、60m、70m高度设置。测风塔的风向观测布置,若布置两层,一般布置在测风塔的10m高度和顶层高度。

3.3 测风系统

风电场选址时,当采用气象台、站所提供的统计数据时,往往只是提供较大区域内的风能资源情况,而且其采用的测量设备精度也不一定能满足风电场微观选址的需要,因此,一般要求对初选的风电场选址区用高精度的自动测风系统进行风的测量。

3.3.1 测风系统技术要求

对风电场进行测风时,除需对风速、风向进行测量外,一般还会在风电场设置1~2套测量温度、气压、湿度等气象要素观测的设备。其测量要求如下:

(1) 风速参数采样时间间隔应不大于3s,并自动计算和记录每10min的平均值和标准偏差以及每10s内的最大风速及其对应的时间和方向。

(2) 风向参数采样时间间隔应不大于3s,与风速参数采样时间同步,并自动计算和记录每10min的风向值。风向转动一周为 360° ;也可以采用扇区表示,一般将风向转动一周分为16个扇区,每个扇区为 22.5° 。

(3) 温度参数应每10min采样一次,并计算和记录每10min温度值(温度单位一般采用 $^\circ\text{C}$)。

(4) 气压参数应每10min采样一次,并计算和记录每10min的气压值(气压单位一般采用kPa或hPa)。

(5) 相对湿度参数应每10min采样一次,并计算和记录每10min的相对湿度值(%)。

3.3.2 测风系统组成

自动测风系统主要由传感器、主机、数据存储装置、电源、安全与保护装置5部分组成。

(1) 传感器分风速传感器、风向传感器、温度传感器(即温度计)、气压传感器等。输出信号为频率(数字)或模拟信号。

(2) 主机利用微处理器对传感器发送的信号进行采集、计算和存储,由数据记录装置、数据读取装置、微处理器、就地显示装置组成。



(3) 由于测风系统安装在野外, 因此数据存储装置(数据存储盒)应有足够的存储容量, 而且为了野外操作方便, 采用可插接形式。一般系统工作一定时间后, 将已存有数据的存储盒从主机上替换下来, 进行风能资源数据分析处理。

(4) 测风系统的电源一般采用电池供电, 为提高系统工作可靠性, 应配备一套或两套备用电源, 如太阳电池等, 主电源和备用电源互为备用, 当某一故障出现时可自动切换。对有固定电源地段(如地方电网), 可利用其为主电源, 但也应配备一套备用电源。

(5) 安全与保护装置由于系统长期工作在野外, 输入信号可能会受到各种干扰, 设备会随时遭受破坏, 如恶劣的冰雪天气会影响传感器信号、雷电天气干扰传输信号出现误差, 甚至毁坏设备等。因此, 一般在传感器输入信号和主机之间增设保护和隔离装置, 从而提高系统运行可靠性。另外, 测风设备应远离居住区, 并在离地面一定高度区内采取措施进行保护以防人为破坏。主机箱应严格密封, 防止沙尘进入。

总之, 测风系统应具备: 设备有较高的性能和精度, 系统有防止自然灾害和人为破坏、保护数据安全准确的功能。

3.3.3 传感器定义与特性

传感器是指能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置, 通常由敏感元件和变换元件组成。

由于电信号便于测量、传输、变换、储存和处理, 因此气象传感器一般为电信号输出。输出的电信号通常有电压、电阻、电容、电流、频率等。气象传感器是直接从信号源(大气中)获得信息的前沿装置, 传感器是否准确、可靠是影响自动气象站观测结果的关键。

传感器一般由敏感元件、变换元器件组成。变换元件也称变换器或变送器, 有时将变换器也作为传感器的一部分。

(1) 敏感元件。敏感元件是直接感受(响应)被测量, 并输出与被测量成确定关系的电或非电的信号元件。

(2) 变换器元件。变换器元件接受敏感元件输出的信号, 转换为标准电信号输出的器件。

并非所有传感器都包括敏感元件和变换器两部分, 例如热敏电阻将被测量温度直接转换成电阻输出, 因此热敏电阻同时兼任变换器功能。传统的传感器、变换器是单独的一部分, 而新型固态电路传感器常将变换器与敏感元件集成在一块半导体芯片上。

传感器将输入的被测量参数转换为电信号输出, 这种输出与输入关系是传感器的基本特性。

1. 线性度

理想情况下, 输出与输入应该为线性关系, 线性的特性便于显示、记录和数据处理。但通常传感器的输出与输入关系并非线性, 一般可用多项式方程表示为



$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (3-1)$$

式中： a_0 为零位输出； a_1 为传感器的灵敏度； $a_2, a_3, \cdots, a_n$ 为非线性特定系数。

实际使用中，当非线性项方次不高或非线性项的系数很小且输入量程不大时，常用一条称为拟合直线的割线或切线来代替实际的特性曲线，但更多的是使用变换器使之线性化，或用计算机直接计算。

2. 灵敏度

传感器在稳态工作时，输出量变化值 Δy 与相应的输入量变化值 Δx 之比，称为传感器的灵敏度 K ，计算式为

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (3-2)$$

3. 响应时间（滞后时间）

通常传感器用来测量某一被测参数时，都不能立即响应该参数的真实情况，它总是逐渐接近被测参数的真实情况，这种滞后现象称为传感器的滞后性或惯性。当被测参数发生阶跃变化时，传感器对它的响应表示为

$$Y = A[1 - e^{(-t/\lambda)}] \quad (3-3)$$

式中： Y 为传感器示值经历时间 t 之后的变化值； A 为阶跃变化的幅度； t 为从该阶跃变化开始所经历的时间； λ 为该传感器（系统）的时间常数。

4. 分辨率

传感器测量时能给出被测量值的最小间隔，分辨率要求能满足气象测量就行，例如空气温度测量分辨率 0.1°C 就达到要求，没有必要细到 0.01°C 。

5. 量程

传感器测量时能给出被测量值的最大范围。量程范围根据被测气象要素的要求而定，例如测量气温要求传感器量程为 $-50 \sim 50^\circ\text{C}$ ，而测量地表温度时量程范围应更大些。

6. 漂移

传感器特性发生变化称为漂移，一般分时漂和温漂等两种。时漂是指当输入量不变时，传感器输出量在规定的时间内发生的变化。温漂是外界环境温度变化引起传感器输出量的变化，温漂又分零点漂移与特性（例如灵敏度）漂移。

3.3.4 风向测量

1. 风向表示

气象上把风吹来的方向定为风向。因此，风来自北，称作北风；风来自南方，称作南风。气象台预报风向时，当风向在某个方向左右摆动不能确定时，则加“偏”字，如在北风方位左右摆动，则叫偏北风。风向测量单位，陆地一般用 16 个或 12 个方位表示，海上则多用 36 个方位表示。若风向用 16 个方位表示，则用方向的英文首字母的大写的组合来表示方向，即北东北（NNE）、东北（NE）、东东北（ENE）、东（E）、东东南（ESE）、东南（SE）、南东南（SSE）、南西南（SSW）、



西南 (SW)、西西南 (WSW)、西 (W)、西西北 (WNW)、西北 (NW)、北西北 (NNW)、北 (N)。静风记 “C”。也可以用角度来表示, 以正北基准, 顺时针方向旋转, 东风为 90° , 南风为 180° , 西风为 270° , 北风为 360° , 如图 3-3 所示。

各种风向的出现频率通常用风玫瑰图来表示。风玫瑰图是在极坐标图上, 给出某年、某月或某日各种风向出现的频率 (数字沿半径线标注), 称为风向玫瑰图。风向玫瑰, 既可画成一天中每个小时的, 又可画成逐月的。分析比较一系列这样的图, 就可以掌握一天或一年中风向的变化。同理, 统计各种风向上的平均风速和风能的图分别称为风速玫瑰图和风能玫瑰图。风向频率和风能频率以玫瑰图表示, 如图 3-4 和图 3-5 所示。风速和风向频率也可以用柱状图表示, 如图 3-6 所示。

$$\text{风向频率} = \frac{\text{某风向出现次数}}{\text{各风向总观测次数}} \times 100\% \quad (3-4)$$

$$\text{风能频率} = \frac{\text{某风向风能}}{\text{各风向总风能}} \times 100\% \quad (3-5)$$

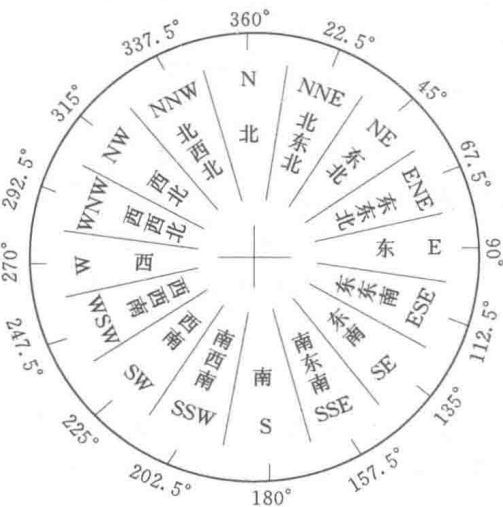


图 3-3 方位风向

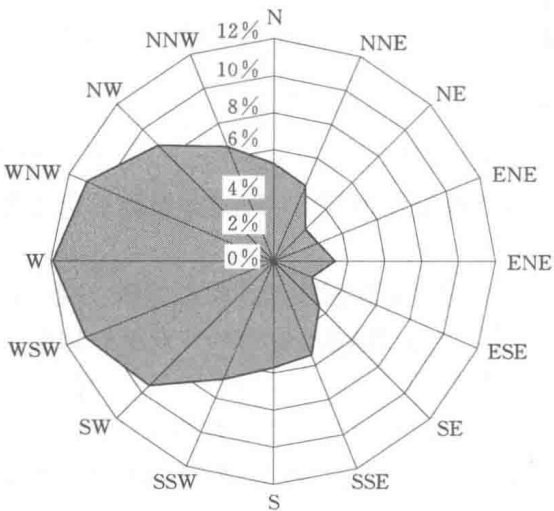


图 3-4 某风场风向频率玫瑰图

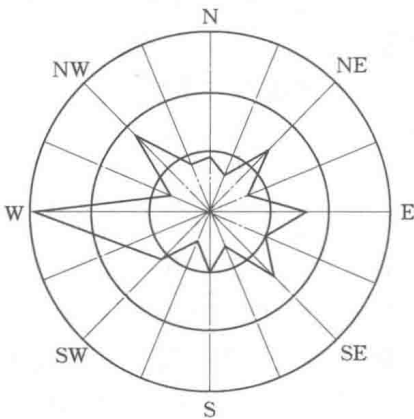


图 3-5 某风场风能频率玫瑰图

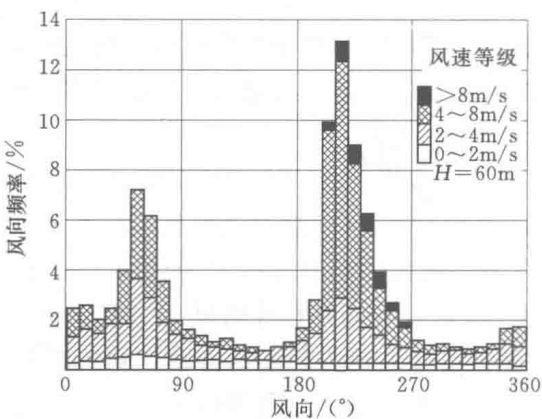


图 3-6 风速和风向频率柱状图



根据当地多年观测资料的年风向玫瑰图中, 风向频率较大方向为盛行风向。以季度绘制的可以有四季的盛行风向。

2. 风向标

风向标是测量风向的最通用的装置, 有单翼型、双翼型和流线型等。风向标一般是由尾翼、指向杆、平衡锤及旋转主轴等 4 部分组成的首尾不对称的平衡装置。其重心在支撑轴的轴心上, 整个风向标可以绕垂直轴自由摆动。在风的动压力作用下取得指向风的来向的一个平衡位置, 即为风向的指示。传送和指示风向标所在方位的方法很多, 有电触点盘、环形电位、自整角机和光电码盘等 4 种类型, 其中最常用的是码盘。风向标如图 3-7 所示。

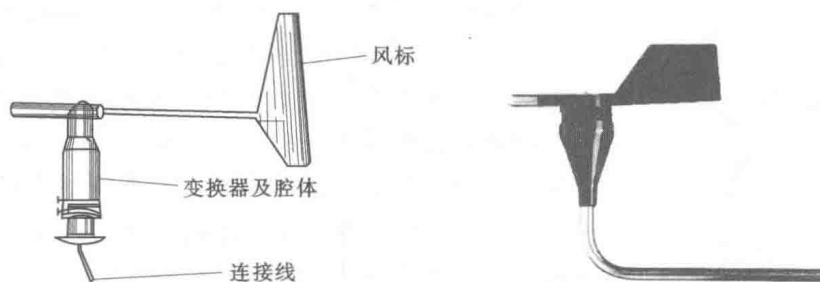


图 3-7 风向标

3.3.5 风速测量

3.3.5.1 风速仪

测量风速的仪器称为风速仪, 其类型有多种, 根据工作原理可分为旋转式风速仪、压力式风速仪、声学风速仪、激光雷达测风仪、散热式风速仪。

1. 旋转式风速仪

它的感应部分是一个固定转轴上的感应风的组件, 常用的有风杯和螺旋桨叶片两种类型。风杯旋转轴垂直于风的来向; 螺旋桨叶片的旋转轴平行于风的来向。

测定风速最常用的传感器是风杯, 杯形风速计的主要优点是它与风向无关, 能够适应多种恶劣的环境, 所以百余年来获得了世界上广泛的采用, 如图 3-8 所示。该类型风速计一般由 3 个或 4 个半球形或抛物锥形的空心杯壳组成。杯形风速计固定在互成 120° 的三叉星形支架上或互成 90° 的十字形支架上, 杯的凹面顺着同一方

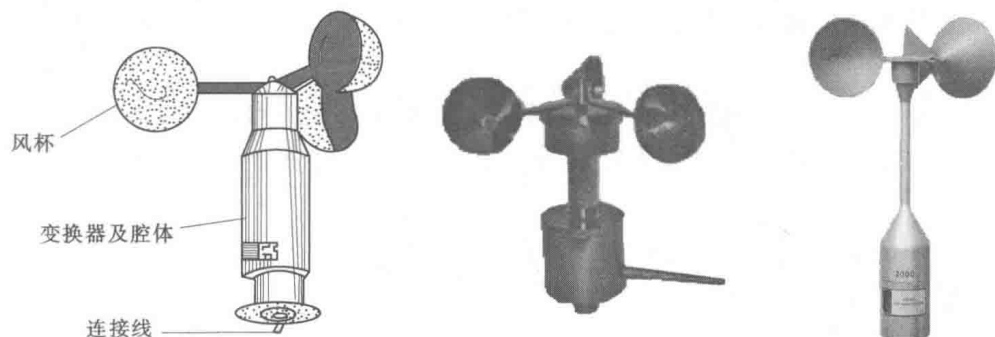


图 3-8 风杯式风速仪



测风仪器
介绍



向, 整个横臂架则固定在能旋转的垂直轴上。

由于凹面和凸面所受的风压力不相等, 风杯受到扭力作用而开始旋转, 它的转速与风速有关。推导风标转速与风速的关系可以有多种途径, 通常在设计风速计时要进行详细推导, 但都要用到杯状测风的阻力公式, 即

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho_a v^2 \quad (3-6)$$

式中: C_D 为阻力系数; A 为杯状物暴露在风中的面积, m^2 ; ρ_a 为空气密度, kg/m^3 ; v 为风速, m/s 。



图 3-9 旋转桨叶式风速仪

螺旋桨式风速仪类似于水平轴风电机组工作一样, 有主要靠升力工作的螺旋桨式的风速仪, 如图 3-9 所示。桨叶式风速表是由若干片桨叶按一定角度等间隔地装置在一垂直面内, 能逆风绕水平轴转动, 其转速正比于风速。桨叶有平板叶片的风车式和螺旋桨式两种。最常见的是由三叶式或四叶式螺旋桨, 装在形似飞机机身的流线形风向标前部, 风向标使叶片旋转平面始终对准风的来向。叶片由轻质材料制成, 如铝或碳纤维热塑料。桨叶旋转方向始终正对风向, 在流向平行于轴的气流中, 桨叶受到升力, 从而使螺旋桨以与风速成正比的速度旋转。为测量风的垂直和水平分力, 3 个桨叶固定在一个共同的桅杆上。可用

余弦定律来表示螺旋桨轴随风向偏转的变化, 这意味着垂直于螺旋桨轴的速度可被置为零。螺旋桨式风速仪可以保持转速与所测风速间相当好的线性关系。与多叶片风速表相比, 它的启动风速较高, 因而灵敏度要差些。

风杯式风传感器与螺旋桨式风传感器在性能方面的比较如下:

(1) 在风杯的断面总面积和螺旋桨叶的总面积相等, 力的作用半径也相同的情况下, 螺旋桨的力矩为风杯力矩的 1.5 倍, 所以螺旋桨式风传感器的效率大于风杯式风传感器的效率。

(2) 螺旋桨式仪器的刻度, 几乎与雷诺数 Re 无关, 所以在湍流中工作时, 线性和稳定性都比较好。而风杯受 Re 的影响较大, 而且风杯本身就是空气流的扰动源。试验表明, 风杯式仪器的读数, 随乱流的强度而变化, 这是风杯式传感器的突出缺点。

(3) 螺旋桨叶轮的距離常数与桨叶数无关, 而风杯则不然。

(4) 在同样条件下, 螺旋桨叶轮所造成的气流平均速度偏高, 比风杯式的小 1.4 倍。

(5) 螺旋桨式叶轮在风为正或者是负的阵型时, 其效率差不多, 而风杯叶轮则以较高的效率感应递增的风速, 对递减的风速感应效率较低。

(6) 使用螺旋桨式风传感器时, 由于其风向标的摆动不能精确地对准风向, 而产生侧面分量, 会部分地降低平均风速, 这可以认为是有益的因素。



(7) 螺旋桨的技术要求比风杯严格，制造工艺也较风杯复杂，所以成本比风杯高得多。

(8) 螺旋桨风传感器风向标转换器为电位器，外加一个激励电压，电位器输出的风向信号是一个正比于尾翼转动角度的模拟电压值，精度难以达到很高的要求；风杯式传感器的转换器为格雷码盘，每一个格雷码代表一个风向，并且每次只能变化一位，有助于消除乱码，因此精度可以做到很高。

综上所述，螺旋桨的理论和实验特性均好于风杯，但出于性能、价格及精度方面的考虑，人们往往选用后者。

2. 压力式风速仪

测量气流速度最常用的仪器，是由皮托管演变而来的。皮托管是一根圆柱形管子，一端开口，另一端连在压力计上，用以测量气流总压。这种管子是 H. Piston 在 1872 年用来测量河流的水深和流速关系的。

皮托静压管测速原理如图 3-10 所示，一个管口迎着气流的来向，它感应着气流的全压力 p_0 ；另一个管口背着气流的来向，所感应的压力为 p ，因为有抽吸作用，比静压力稍低些。两个管子所感应的压力差 Δp 为

$$\Delta p = p_0 - p = \frac{1}{2} \rho V^2 (1 + c) \quad (3-7)$$

$$v = \left[\frac{2 \Delta p}{\rho (1 + c)} \right]^{1/2} \quad (3-8)$$

式中： ρ 为空气密度， kg/m^3 ； v 为风速， m/s ； c 为修正系数。

由式 (3-8) 可计算出风速，可看出风速与风压不是线性关系。

3. 声学风速仪

超声波测风是超声波检测技术在气体介质中的一种新应用，它和传统机械式测风仪相比，超声波测风仪测风过程中无机械磨损，理论上无启动风速，反应速度快、测量精度高、分辨率高、维护成本较低、能测量风速中的高频脉动成分。由于它很好地克服了机械式风速风向仪固有的缺陷，能全天候、长久地正常工作，故越来越广泛地得到使用，它将是机械式风速仪强有力的替代品。

(1) 超声波流量测量原理。声学风速仪是利用声波在大气中的传播速度与风速间的函数关系来测量风速。声波在大气中传播的速度为声波传播速度与气流速度的代数和。它与气温、气压、湿度等因子有关。在一定距离内，声波顺风与逆风传播有一个时间差。由这个时间差，便可确定气流速度。

声波风速仪通常设置 3 个手臂，彼此垂直安装，在臂端安装了传感器，通过空气向上或向下发出声波信号。运动空气中的声速不同于静止空气中的声速。用 v_s 表示静止空气中的音速， v 表示风速。如果声音和风向同一方向移动，则由此产生

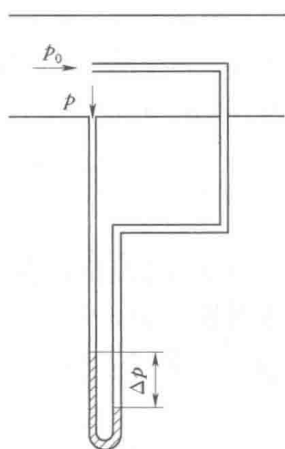


图 3-10 皮托管测流速
工作原理



的声波速度 v_1 可表示为

$$v_1 = v_s + v \quad (3-9)$$

同样, 如果声波的传递与风向相反, 则由此产生的声波速度 v_2 可表示为

$$v_2 = v_s - v \quad (3-10)$$

根据式 (3-9) 和式 (3-10), 可得出

$$v = \frac{v_1 - v_2}{2} \quad (3-11)$$

(2) 直接时差法三维测风原理。使用直接时差法的三维超声波风速风向仪在硬件结构上, 与二维超声波风速风向仪的区别仅是多了一对超声波探头, 以用作两个方向上风速值的获取, 实现较为简单, 由 6 只超声波传感器分成 3 组, 分别沿空间直角坐标系的 x 、 y 、 z 三个轴相对放置。

设风速为 v , 在 x 、 y 、 z 轴向上的速度分量分别为 v_x 、 v_y 、 v_z , c 为超声波传播速度; 取空间中任一位置 (x, y, z) , 令 t 为声波从原点传播至 (x, y, z) 所需的时间, 那么有

$$(x - v_x t)^2 + (y - v_y t)^2 + (z - v_z t)^2 = c^2 t^2 \quad (3-12)$$

$$v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 = v^2 \quad (3-13)$$

测量中为简化计算, 要求传播距离远大于声波波长, 这点一般可以得到保证。具体到某个坐标轴向上, 如 z 轴上点 $(d, 0, 0)$, 此处 d 即为两个探头间的距离, 将 (x, y, z) 和 $(d, 0, 0)$ 代入式 (3-12), 有

$$\frac{d^2}{t^2} - \frac{2d}{t} v_x - (c^2 - v^2) = 0 \quad (3-14)$$

求解, 得 $\frac{d}{t} = \sqrt{c^2 - v^2 + v_x^2} + v_x$, 设顺、逆风传播时间为 t_1 、 t_2 , 并使 v 本身恒为正, 则

$$\frac{d}{t_1} = \sqrt{c^2 - v^2 + v_x^2} + v_x \quad (3-15)$$

$$\frac{d}{t_2} = \sqrt{c^2 - v^2 + v_x^2} - v_x \quad (3-16)$$

求解得 $v_x = \frac{d}{2} \left(\frac{t_2 - t_1}{t_2 t_1} \right)$ 。以此类推可得 v_y 、 v_z 值, 代入式 (3-13) 即可得实时风速, 通过矢量合成即可获得环境的三维风矢量。这种方法对于窄带的超声信号, 基本消除了声速 c 的影响 (即消除了温度的影响), 只需测取行 t_1 、 t_2 , 便可以得到当前风速与风量关系。在 $0 \sim 65 \text{ m/s}$ 内测出的风速是可靠且准确的。但是, 超声波测风仪比其他类型的风速仪更昂贵。三维超音速风速传感器如图 3-11 所示。

对于风速、风向的测量, 在许多情况下, 是风速和风向仪为一体的风速和风向传感器, 如图 3-12、图 3-13 所示。



图 3-11 三维超音速
风速传感器

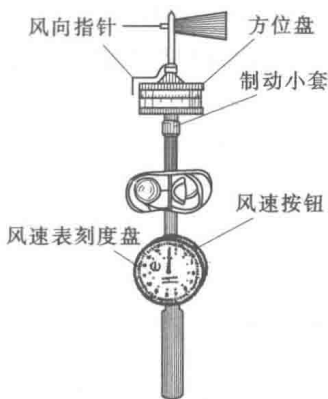


图 3-12 轻便风向风速表

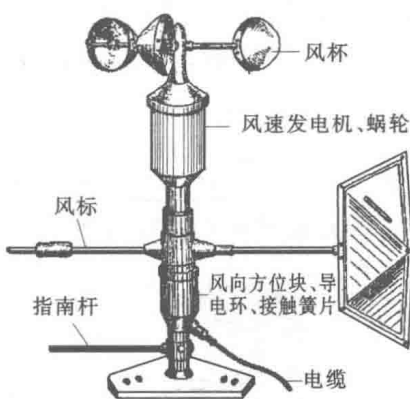


图 3-13 EL 型风向风速计传感器

4. 激光雷达测风仪

按照激光器工作方式不同，多普勒测风激光雷达可以分为连续测风激光雷达和脉冲测风激光雷达。连续测风激光雷达和脉冲测风激光雷达的原理相同，都是通过回波信号中的多普勒频移反演风速信息。

激光雷达的多普勒效应，多普勒效应指的是当电磁波移向观察者时观测到的电磁波频率变高，在波源远离观察者时频率变低的物理现象。多普勒效应是测风激光雷达探测风场信息的基础。由于多普勒效应，当大气气溶胶粒子和大气分子相对于激光束运动时，接收到的散射光频率发生一定频移，该频移量不仅取决于发射激光束的频率，而且还与大气气溶胶和大气分子的相对运动速度、运动方向及散射角度相关。双基激光雷达多普勒原理示意图如图 3-14 所示。

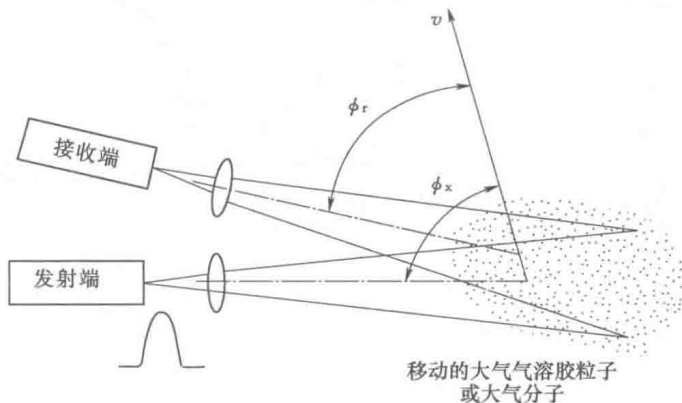


图 3-14 双基激光雷达多普勒原理示意图

当频率为 $f_x(\text{Hz})$ 、波长为 $\lambda(\text{m})$ 的发射激光被携带大气风速信息 $v(\text{m/s})$ 的气溶胶粒子和大气分子散射时，由于多普勒效应，以气溶胶粒子和大气分子为参照系，激光器的发射频率为

$$f_p = f_x + \frac{v}{\lambda} \cos \phi_x \tag{3-17}$$



式中： ϕ_x 为粒子运动方向与发射望远镜光轴方向之间的夹角。

同理以接收望远镜为参照系，散射激光的频率为

$$f_r = f_p + \frac{v}{\lambda} \cos \phi_r \quad (3-18)$$

式中： ϕ_r 为粒子运动方向与接收望远镜光轴方向之间的夹角。

因此发射激光和接收激光之间频率存在一个差值，这个值就是激光多普勒频移，即

$$\Delta f = f_r - f_x = \frac{2v(\cos \phi_x + \cos \phi_r)}{\lambda} \quad (3-19)$$

式(3-19)是由双端测风激光雷达系统推导出来的，对于单端测风激光雷达系统同样适用。令入射角和散射角之间满足 $\phi_x = \phi_r = 0$ ，即可得到单端系统中由风速造成的多普勒频移为

$$\Delta f = \pm \frac{2v}{\lambda} \quad (3-20)$$

式中：正号为径向风速方向与粒子后向散射光方向一致；负号为径向风速方向与粒子后向散射光方向相反。

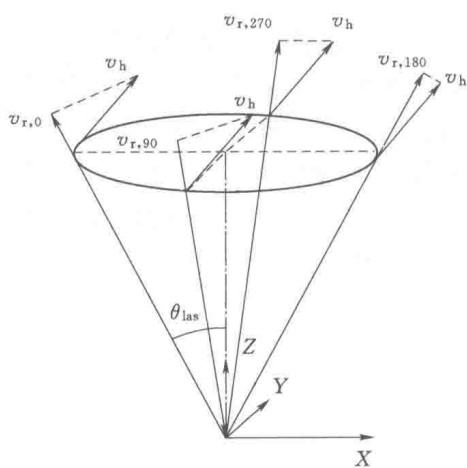


图 3-15 多普勒激光雷达测风示意图

式(3-19)建立了多普勒频移与大气风速之间的定量关系，通过探测多普勒频移量就可以反演得到大气的风速和风向。

实际上由多普勒激光雷达直接测到的是径向风速。雷达以 θ_{las} 的角度 ($\theta_{las} = 15^\circ$ 或 30°) 向上做圆锥扫描，多普勒激光雷达测风示意图如图3-15所示，获取圆锥面上的径向风速 v_r ，提取东南西北4个方位角上的径向风速 $v_{r,270}$ 、 $v_{r,0}$ 、 $v_{r,90}$ 、 $v_{r,180}$ ，再结合扫描圆锥角 θ_{las} ，利用三角函数关系即可得到水平风速 v_h (包括 X 轴分量 u 和 Y 轴分量 v)、风向 α 以及 Z 轴风速 ω ，具体可以表达为

$$u = \frac{v_{r,90} + v_{r,270}}{2 \sin \theta_{las}} \quad (3-21)$$

$$v = \frac{v_{r,0} + v_{r,180}}{2 \sin \theta_{las}} \quad (3-22)$$

$$\omega = \frac{v_{r,0} + v_{r,90} + v_{r,180} + v_{r,270}}{4 \cos \theta_{las}} \quad (3-23)$$

$$v_h = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3-24)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{v}{u}\right) \quad (3-25)$$



5. 散热式风速仪

当流体沿垂直方向流过金属丝时，将带走金属丝的一部分热量，使金属丝温度下降。根据强迫对流热交换理论，可导出热线散失的热量 Q 与流体的速度 v 之间存在关系式。标准的热线探头由两根支架张紧一根短而细的金属丝组成，金属丝通常用铂、铑、钨等熔点高、延展性好的金属制成。常用的丝直径为 $5\mu\text{m}$ ，长为 2mm ；最小的探头直径仅 $1\mu\text{m}$ ，长为 0.2mm 。根据不同的用途，热线探头还做成双丝、三丝、斜丝及 V 形、X 形等。为了增加强度，有时用金属膜代替金属丝，通常在一热绝缘的基体上喷镀一层薄金属膜，称为热膜探头。热线探头在使用前必须进行校准，静态校准是在专门的标准风洞里进行的，测量流速与输出电压之间的关系并画成标准曲线；动态校准是在已知的脉动流场中进行的，或在风速仪加热电路中加入一脉动电信号，校验热线风速仪的频率响应，若频率响应不佳可用相应的补偿线路加以改善。热线风速仪如图 3-16 所示。



图 3-16 热线风速仪

3.3.5.2 风速记录

风速记录是通过信号的转换方法来实现，一般采用以下方法：

- (1) 机械式。当风速感应器旋转时，通过蜗杆带动蜗轮转动，再通过齿轮系统带动指针旋转，从刻度盘上直接读出风的行程，除以时间得到平均风速。
- (2) 电接式。由风杯驱动的蜗杆，通过齿轮系统连接到一个偏心凸轮上，风杯旋转一定圈数，凸轮使相当于开关作用的两个触头闭合或打开，完成一次接触，表示一定的风程。
- (3) 电机式。风速感应器驱动一个小型发电机中的转子，输出与风速感应器转速成正比的交变电流，输送到风速的指示系统。
- (4) 光电式。风速旋转轴上装有一圆盘，盘上有等距的孔，孔上面有一红外光源，正下方有一光电半导体，风杯带动圆盘旋转时，由于孔的不连续性，形成光脉冲信号，经光敏晶体管接收放大后变成电脉冲信号输出，每一个脉冲信号表示一定的风的行程。光电式风速记录原理如图 3-17 所示。

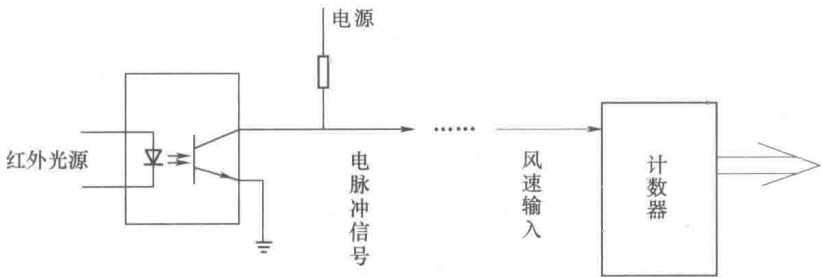


图 3-17 光电式风速记录原理图



3.3.5.3 风速表的标定

为了运行可靠,尽可能地减小风速表的测量误差,风速仪的定期标定是有必要的。校准是在理想条件下制定一个基准风速作为标准。风速仪测量数据质量取决于其自身特性,如精度、分辨率、灵敏度、误差、响应速度、可重复性和可靠性。例如,一个典型的杯状风速仪有 $\pm 0.3\text{m/s}$ 的精度,风速的最微小的变化能被风速仪检测出,灵敏度即输出与输入信号的比值;误差来源于指示速度与实际速度之间的偏差;响应速度表明了风速仪检测到风速变化的快慢程度;重复性表明在相同的条件下多次测量时所读取数据的接近程度;可靠性表明在给定风速的范围内风速仪成功工作的可能性。风速仪的这些属性应当定期检查。

标定的方法有两种:①使用专门的热线探头标定仪进行标定;②在风洞中使用参考速度标定探头进行标定。第一种标定方法比较准确,但是由于设备所限,一般使用第二种方法对风速仪进行标定。

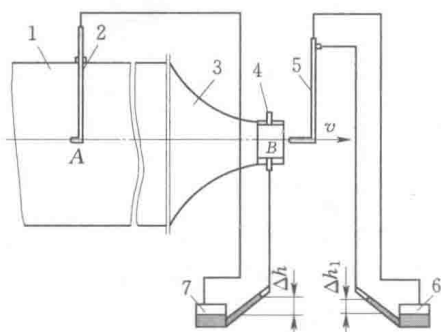


图 3-18 射流式校准风洞测量系统

- 1—稳流段; 2—总压管; 3—收敛性;
4—静压测孔; 5—被标定的皮托管;
6, 7—微压计

校准风洞有吸入式、射流式、吸入—射流复合式以及正压式等多种类型,其中最常用的是图 3-18 中的射流式校准风洞。射流式校准风洞有稳流段和收缩段构成,稳流段内装有整流网和整流栅格。供应给风洞的压缩空气先通过稳流段,在通过收缩段形成自由射流。

以皮托管风速的标定为例,被标定的皮托管感压探头迎风置于风洞出口处,其总压孔轴线对准校准风洞的轴线。标定时,皮托管动压读数为微压计示出的 Δh_1 。相应的标准动压由安装在稳流段 A 处的总压管和开在射流段 B 处的静压孔组合测取,即为图 3-18 所示的 Δh 。

在所选择的标定流速范围内,记录各稳定气流流速下校准风洞的标准动压值 Δh 和被标定皮托管的动压值 Δh_1 。整理测定数据,结果被拟合合成标定方程,或绘制成标定曲线,以备皮托管测量风速时查用。当 Δh 与 Δh_1 之间呈线性关系时,可以直接求出被标定皮托管的校准系数 ζ ,即

在所选择的标定流速范围内,记录各稳定气流流速下校准风洞的标准动压值 Δh 和被标定皮托管的动压值 Δh_1 。整理测定数据,结果被拟合合成标定方程,或绘制成标定曲线,以备皮托管测量风速时查用。当 Δh 与 Δh_1 之间呈线性关系时,可以直接求出被标定皮托管的校准系数 ζ ,即

$$\zeta = \sqrt{\frac{\Delta h}{\Delta h_1}} \quad (3-26)$$

3.3.5.4 风速表示

各国表示速度单位的形式不尽相同,如用 m/s (米/秒)、 n mile/h (海里/小时)、 km/h (千米/小时)、 ft/s (英尺/秒)、 mile/h (英里/小时)等。各种单位换算的方法见表 3-1。

风速大小与风速计安装高度和观测时间有关。世界各国基本上都以 10m 高度处观测为基准,但取多长时间的平均风速不统一,有取 1min、2min、10min 平均风速,有取 1h 平均风速,也有取瞬时风速等。



表 3-1 各种风速单位换算表

单 位	m/s	n mile/h	km/h	ft/s	mile/h
1m/s	1	1.944	3.600	3.281	2.237
1n mile/h	0.514	1	1.852	1.688	1.151
1km/h	0.278	0.540	1	0.911	0.621
1ft/s	0.305	0.592	1.097	1	0.682
1mile/h	0.447	0.869	1.609	1.467	1

我国气象站观测时有 3 种风速，一日 4 次定时 2min 平均风速，有的记 10min 平均风速和瞬时风速。风能资源计算时，都用记 10min 的平均风速。安全风速计算时用最大风速（10min 平均最大风速）或瞬时风速。

3.3.6 其他气象参数测量

1. 气温测量

风资源测量对温度传感器性能的有关规定在 NB/T 31147—2018《风电场工程风能资源测量与评估技术规范》中，温度传感器要求测量范围为-40~50℃，精确度为±1℃。金属铂电阻温度表是利用金属电阻随温度变化的原理制成的温度传感器，电阻与温度的关系为

$$R_t=R_0(1+\alpha t+\beta t^2)$$
 (3-27)

式中： R_t 为温度 t 时的电阻； R_0 为 0℃时的金属电阻； α 和 β 为电阻的一次和二次项温度系数。

温度传感器的金属材料选择主要考虑：①温度一次项系数较大，即灵敏度较大；②电阻与温度关系的二次项系数 β 远远小于 α ；③电阻率大，易于绕制高阻值的元件；④性能稳定。

由于铂金属的物理化学性能稳定，材料易于提纯，测温精确度高，复现性好，因此测风站主要采用铂电阻作为测温传感器的材料。在 0℃时，有 $R_0=100\Omega$ ，经过标定可得出 α 和 β 的值。

铂电阻元件用很细的铂丝绕在云母、石英和其他材料的架上，其外涂上防湿、防腐蚀的保护层，用银丝引出，装入金属外套管。为避免电感影响采用双线无感绕法。铂电阻变换器测量电路的功能，是将随温度变化的电阻值转换为电压信号，测量方法常用四线恒流源法。其测量原理如图 3-19 所示。

在测量时，恒流源 I_0 和运放电路处于稳定状态，通过切换测出铂电阻 R_t 和 R_0 （标准电阻）输出的电压值分别为 U_t 和 U_0 ，计算为

$$\begin{cases} U_t=I_0R_t \\ U_0=I_0R_0 \end{cases}$$
 (3-28)

因此， R_t 为

$$R_t=R_0\frac{U_t}{U_0}$$
 (3-29)

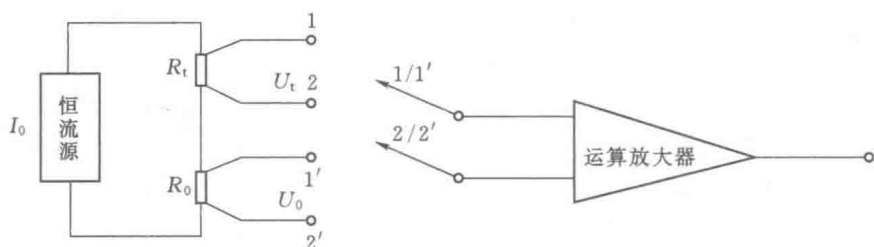


图 3-19 热电阻测温原理

将式 (3-29) 代入式 (3-27) 中, 计算出温度 t 。

为了避开贴地面温度剧烈变化的影响, 世界气象组织 (WMO) 规定: 测定气温用的, 传感器离地面高度为 1.25~2.0m。由于风能资源测量的特殊性, 故在风电场风能资源测量的标准中规定, 气温测量要求离地高 3m。温度传感器如图 3-20 所示。

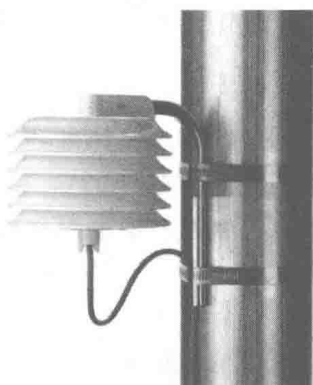


图 3-20 温度传感器

对于气温的测量, 要求传感器只能与空气进行热交换, 但由于太阳的直射辐射、地面的反射辐射, 以及其他类型的天空辐射和长波辐射等的辐射热也介入到与传感器进行热交换, 使得传感器指示的温度与实际气温有较大的差别。在白天太阳辐射强时使传感器温度远高于实际气温, 在极端条件下, 其差值可达到 25℃, 夜间则偏低, 因此减小辐射误差是气温观测中的关键问题。防止辐射误差的最简单方法是屏蔽, 使太阳辐射和地面反射辐射等不能直接照射到传感器上, 主要的屏蔽设备有百叶窗和防辐射罩等。

2. 气压测量

气压是作用在单位面积上的大气压力, 即等于单位面积上向上延伸到大气上界的垂直空气柱的重量。大气压力测量的基本单位是帕斯卡 (Pa, 即牛顿每平方米)。常以百帕 (hPa) 为单位, 取一位小数。气象上使用的所有气压表的刻度均应以 hPa 分度。在风电场测量中, 依据风电场风能资源测量方法的标准, 风电场的大气压单位为 kPa。

气压场分析是气象科学的基本需要, 应该把气压场看成是大气状态的所有预报产品的基础。在条件允许的情况下, 气压测量应该做到技术上能达到多高准确度就要求多高的准确度。必须保持在全国范围内气压测量和校准的一致性。风电场中所使用的气压传感器测量值作为本场气压。

在 NB/T 31147—2018 中, 要求气压传感器测量范围为 60~108kPa, 精确度为 $\pm 3\%$ 。

在风电场测量中, 风能资源数据记录仪采用在我国自动气象站中普遍采用的硅膜盒电容式气压传感器, 在使用中, 一般使用其电压输出类型。变容式硅膜盒是由薄层单晶硅用静电焊接方法焊接在一个镀有金属导电膜的玻璃片上, 中间形成真空



而组成硅膜盒，在薄层单晶硅片上靠近玻璃片两边处，用蚀刻方法形成硅膜，并对硅膜采用喷镀金属方法使其具有导电性，而使导电玻璃片与硅膜形成平行板电容器，分别为该平行板电容器的两个电极，如图 3-21 所示。

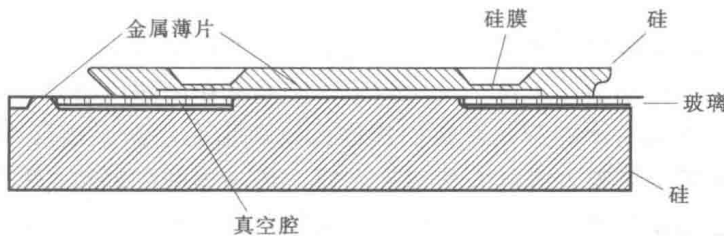


图 3-21 硅膜盒电容式气压传感器

在结构上，将该变容硅膜盒玻璃板片装在单晶硅层上，形成传感器的刚性基板，以使结构牢固，具有较好的抗机械和热冲击性能。由于传感器中所使用的硅材料和玻璃材料的热膨胀系数是彼此仔细匹配的，为使温度影响减到最小，在 1000hPa 时设计它的温度影响为零，并在连续增温条件下进行热老化，使其长期稳定性增加到最大。因单晶硅材料具有理想的弹性特性，而该传感器中弹性变形仅使用到硅材料整个弹性范围的百分之几。故该传感器具有测量范围宽，滞差极小，重复性好以及无自热效应。当该变容硅膜盒外界大气压力发生变化时，单晶硅膜盒随着发生弹性变形，从而引起硅膜盒平行板电容器电容量的变化。该传感器的测量电路是 RC 振荡器，在振荡器中有 3 个参考电容器。使用参考电容的目的是在连续测量过程中，用来检验电容压力传感器和电容温度补偿传感器。测量时，由多路转换器把 5 个参考电容器一次一个按顺序接到 RC 振荡器中去。因此，在一个测量周期中，可以测量到 5 个不同频率。气压传感器外观如图 3-22 所示。



图 3-22 气压传感器

3.3.7 测风仪器选择

- (1) 风速仪的测量范围为 0~60m/s，测量误差范围±0.5m/s，工作环境气温为-40~50℃。
- (2) 风向传感器的测量范围为 0°~360°，精确度±2.5°，工作环境气温为-40~50℃，安装时风向传感器应该定位在正北。
- (3) 数据采集器应具有本标准规定的测量参数的采集、计算和记录功能，应能在现场可以直接从外部观察到采集的数据，应具有在现场或室内下载数据的功能，应能完整保存不低于 3 个月采集的数据量，应能在现场工作环境温度下可靠运行。
- (4) 大气温度计测量范围在-40~50℃之间，精确度为±1℃。
- (5) 大气压力计测量范围在 60~108kPa 之间，精确度为±3%。



(6) 数据采集器至少可以储存 6 个月的数据, 并且在一座测风塔上安装了无线传输装置, 每天给电子信箱发送一次一天的数据以便于观察测风仪器的运行情况。

3.3.8 测风设备安装

风速仪、风向标传感器分别安装在已确定高度处的测风塔上, 为减小测风塔的塔影效应对传感器的影响, 风速、风向传感器应固定在由测风塔塔身水平伸出的牢固支架上, 传感器离塔体的距离: 桁架式结构测风塔为塔架平面尺寸的 3 倍以上、圆管形结构测风塔为塔架直径的 6 倍以上, 固定传感器的支架应进行水平校正。安装风速传感器的支架与测风区主风方向的夹角控制在 $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。风向标应根据当地磁偏角修正, 按实际北方向进行定向安装。风向标死区范围应避开主风方向。数据采集器应放置在安装盒中, 安装盒应固定在测风塔上的适当位置 (一般选在测风塔 8~10m 高度的位置), 或者安装在现场的临时建筑物内; 安装盒应具备防水、防冻、防腐蚀和防沙尘等特性。温度计、气压计、湿度计一般安装在测风塔 5~10m 高度的位置或现场临时气象观测装置内。

1. 风速和风向传感器

- (1) 把上层传感器安装在离塔架顶端至少 0.3m 的位置以减少潜在的塔影效应。
- (2) 传感器要安装在单独的横梁上。对安装在塔架侧面的传感器, 支架应水平地伸出塔架以外至少 3 倍桁架式塔架的宽度, 或 6 倍圆筒式塔架的直径。三角形桁架式塔架, 塔架宽度指的是一个面的宽度。
- (3) 传感器安装在塔架主风向的一侧, 如果有不止一个主风向, 则安装在能减小塔架和传感器尾流影响的一侧。
- (4) 传感器的位置应在支架以上至少 8 倍支架直径的高度。对矩形截面的支臂, 直径等于支臂垂直方向的长度。
- (5) 传感器泄水孔不能被垂直安装的杆件阻挡, 以防止在冬季内部结冰。应该用管材而不是实体材料。
- (6) 风向标盲区 (无记录区) 的位置不能直对盛行风向。盲区的方向至少偏离主风向 90° , 最好在基本方位上。
- (7) 塔架立起后要校验风向标死区。如果死区和安装支架对齐, 应用罗盘校验到比较高的精度。

2. 温度传感器

- (1) 传感器要带护罩, 安装位置离塔架表面至少一个塔架直径距离, 以减小塔架本身热作用的影响。
- (2) 传感器在塔架上的位置要尽可能在盛行风向上, 以保证足够的通风。

3. 数据采集器和相关硬件

- (1) 在数据采集器内放置干燥剂包以防潮。
- (2) 把数据采集器、连接电缆、通信设备放入安全的防护箱内, 能够锁住并抵御恶劣天气。
- (3) 防护箱在塔架的安装位置要足够高, 高于平均积雪深度, 并能防止被故意



破坏。

(4) 如果用太阳能,要把太阳电池板放到防护箱之上以防阴影,朝向南方并接近直立以减少脏物堆积和在冬季太阳角度较低时能获得最大的能量。

(5) 确保所有进设备防护箱的电缆都有滴水回路。

(6) 密封防护箱的所有开口,如销口,以防止漏雨、昆虫和啮齿动物造成破坏。

(7) 如果用移动通信,把通信天线放在容易够着的高度。

4. 传感器连接和电缆

(1) 用硅树脂密封传感器接线端口,用橡胶套保护以免直接暴露。

(2) 把传感器电缆沿塔架长度方向缠绕并用抗紫外线的线绳或电气绝缘胶布绑住。

(3) 在每个风速计和风向标端口加装金属氧化物压敏电阻作瞬时保护。

(4) 为防止传感器导线和支撑构件(如拉绳塔架的地锚环)发生摩擦,用带子缠绕传感器导线并留有足够的长度。

5. 接地系统

(1) 在已有塔架上安装,把数据采集器的地线接到塔架的接地系统。

(2) 在塔架上安装避雷针并通过导线接地。

(3) 确保接地杆上没有绝缘涂层,如油漆、瓷釉。

(4) 把所有的接地杆连在一起以保证电流连续,所有接地杆埋在地表以下。在有岩石的地方,使接地杆成 45° ,或埋入至少深6m的电缆沟,越深越好。关键是使其与土壤的接触面积达到最大。

(5) 保护接地杆上端的土壤以及导线接触不受破坏,有冻土的地方,接地极要在冻土层以下。

(6) 使用单点接地系统,确定土壤类型和阻抗等级,一般阻抗越低,接地越好。

(7) 确保接地系统与土壤的阻抗小于 100Ω ,在所有接地连接处涂还原剂。

3.3.9 现场调试

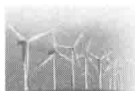
现场测试包括两方面的工作:一是在斜拉式塔架立起之前或安装人员在塔架高处的时候,设备要经过测试,使其正常工作;二是安装完成后的功能测试。现场调试主要包括以下任务:

(1) 确保所有传感器测得的数据合理。

(2) 校验所有的系统电源都起作用,并确保数据采集器处于合适的长期供电状态。

(3) 校验数据采集器的输入参数,包括测站编号、日期、时间和传感器的斜率与偏移量。

(4) 校验数据获取过程。对移动电话信号传输系统来说,用办公地点的计算机下载数据,把传输的数据和现场读数做比较。



(5) 记录离开的时间和所有观察到的相关事务。

3.3.10 文档记录

在测站信息记录中完整而详细地记录所有测站特性,包括数据采集器、传感器和支持构件的信息。主要包括以下信息:

(1) 测站描述。包括一个唯一的测站编号,一份地图标明测站位置和海拔,纬度和经度,安装日期和调试时间。在站址选择或安装过程中应该确定测站的坐标,并用GPS接收器确认。坐标最好对经度和纬度精确到 $0.1'$ (最低100m),对海拔至少精确到10m。这样能避免在地图上不注意标错测站的位置和从地图上读错坐标。

(2) 测站设备清单。把所有设备(数据采集器,传感器和支持构件)的生产厂家、型号、出厂编号、安装高度和方向(包括移动电话天线和太阳电池板)。传感器信息应包括斜率和偏移量和数据采集器接线端口号。

3.3.11 测风运行管理

目前风电场测风数据的收集、传输一般采用自动方式,同时还可以远程监控。因此,在风电场测风运行期间,应随时注意测风数据、测风设备运行、数据传输是否正常,一旦发现异常,应及时进行处理。除进行远程监控外,还应定期或不定期到风电场现场对仪器设备进行检查,从测风记录存储卡上收集原始测风数据;若条件许可,还应在风电场当地选择至少一名工作人员不定期地对风电场测风设备进行巡视。风电场前期测风一般要持续一年以上,因此最好每个月对测风数据进行初步的整理分析,主要对测风数据的完整性、合理性、平均风速、平均风功率密度、风向分布等进行统计分析,发现测风过程中存在的问题,及时提出解决的方法和建议。

风电场在经历连续一年以上的正常测风后,对风电场测风资料进行全面的整理分析,提出风电场风能资源评估报告。为项目建设单位提出风电场的测风是否有必要继续进行,以及风电场是否具有开发价值等建设性意见。

3.4 测风数据处理

测风数据处理包括对测风数据的验证及计算处理等。

3.4.1 数据验证

在验证处理测风数据时,必须先进行审定,主要从数据的代表性、准确性和完整性着手,因为它直接关系到现场风能资源的大小。

对提取的测风数据进行检查,判断其完整性、连贯性和合理性,挑选出不合理的、可疑的数据以及漏测的数据,对其进行适当的修补处理,从而整理出较实际合理的完整数据以供进一步分析处理。